

浙江莫干山花岗岩体锆石 U-Pb、全岩 Rb-Sr 年代学、Sr-Nd-O 同位素地球化学及成因研究

章邦桐, 王凯兴, 凌洪飞, 吴俊奇

内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210093

摘要:莫干山花岗岩体位于东天目山晚中生代火山盆地东端,用 LA-ICPMS 进行锆石 U-Pb 定年得到年龄为 128.1 ± 2.1 Ma,全岩 Rb-Sr 等时线定年结果为 135.4 ± 4.3 Ma,表明其属燕山晚期岩浆活动产物。莫干山花岗岩的 Sr-Nd-O 同位素分析结果为:初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.70933$; $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-3.75 \sim -6.4$; $\delta^{18}\text{O}=8.86\% \sim 10.78\%$,表明其成因类型属 I 型花岗岩,是壳-幔物质混合形成的。按 Sr-Nd 双变量二元混合模型计算出源区物质中地壳端员和亏损地幔端员的贡献份额分别为 $47\% \sim 49\%$ 、 $51\% \sim 53\%$ 。莫干山花岗岩与建德群黄尖组火山岩的锆石 U-Pb 年龄、全岩 Rb-Sr 等时线年龄基本一致,其 Nd-Sr 同位素组成也很相似,表明它们来自同一岩浆源。

关键词:锆石 U-Pb 法;全岩 Rb-Sr 等时线法;Sr-Nd-O 同位素;I 型花岗岩;莫干山花岗岩体

中图分类号:P597 文献标识码:A 文章编号:1007-2802(2012)04-0347-07

Zircon U-Pb and Whole-rock Rb-Sr Chronology, Sr-Nd-O Isotopes and Petrogenesis of the Mogaoshan Granite Pluton in the Zhejiang Province

ZHANG Bang-tong, WANG Kai-xing, LING Hong-fei, WU Jun-qi

State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences,
Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: The Moganshan granite pluton locates in the eastern part of a late Mesozoic volcanic basin in the Tianmu mountain. LA-ICPMS U-Pb dating of zircon from the granite yields an age of 128.1 ± 2.1 Ma, and an isochron age of 135.4 ± 4.3 Ma is obtained from whole-rock Rb-Sr in the pluton, indicating it was formed in the late Yanshanian period. Results of Sr-Nd-O isotope analyses for the Moganshan granite (initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.70933$; $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-3.75 \sim -6.4$; $\delta^{18}\text{O}=8.86\% \sim 10.78\%$) show that it belongs to I-type granite with a source of mixed mantle-derived rocks and crustal rocks. Calculations based on the bivariate (Sr-Nd) and two-components (mantle-and crust-rocks) mixing model suggest that contributions of depleted mantle end-member and crustal end-member in the formation of the granite are $47\% \sim 49\%$ and $51\% \sim 53\%$, respectively. The zircon U-Pb age and the whole rock Rb-Sr age for the Moganshan granite are consistent with those of volcanic rocks in the Huangjie formation. Furthermore the Sr-Nd isotopic compositions of the granitic and volcanic rocks are also similar. Therefore, we conclude that the Moganshan granite and the volcanic rocks of the Huangjie Formation were derived from a same magmatic source.

Key words: zircon LA-ICPMS U-Pb dating; whole-rock Rb-Sr dating; Sr-Nd-O isotopes; I-type granite; moganshan granite pluton

位于浙江德清县的莫干山花岗岩体产于晚中生代火山盆地中,与早白垩世建德群黄尖组火山岩关系密切,同时也是我国著名的莫干山旅游避暑胜地。

李坤英等^[1]对浙江建德群黄尖组火山岩进行了同位素年代学研究,确定黄尖组火山岩的锆石 U-Pb 年龄及全岩 Rb-Sr 等时线年龄分别为 129.5 ± 2.6 Ma

收稿日期:2011-10-10 收到,11-04 改回

基金项目:中国核工业地质局“十二五”高校科技攻关项目;内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室开放项目(2008-1-04)

第一作者简介:章邦桐(1934-),男,博士生导师,研究方向:核能地质及成矿理论. E-mail: zhangbt@nju.edu.cn.

和 127.94 Ma。现有资料表明,莫干山花岗岩体的 K-Ar 年龄为 86~103 Ma^[2],但缺乏精确的同位素年代学研究。为此,本文对莫干山花岗岩体采用精确的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 法及全岩 Rb-Sr 等时线法进行测年,并结合相应的 Sr-Nd-O 同位素组成的研究,探讨其形成年龄的格架、成因类型及与中生代火山岩的关系。

1 区域地质概况

莫干山花岗岩体位于东天目山于潜复向斜内早白垩世火山盆地东北端,受北东向庾村断裂控制,呈不规则状小岩株产出,出露面积约 9.8 km²^[3]。岩体由中-粗粒、局部为细粒黑云母钾长花岗岩及黑云母二长花岗岩组成,具花岗岩结构,主要造岩矿物为钾长石(>40%)、斜长石(约 20%)、石英(25%~35%)和黑云母(3%~5%)。二长花岗岩中含较多细粒二长花岗岩包体。莫干山花岗岩体与建德群黄尖组流纹质及英安质火山岩呈构造侵入接触(图 1)。

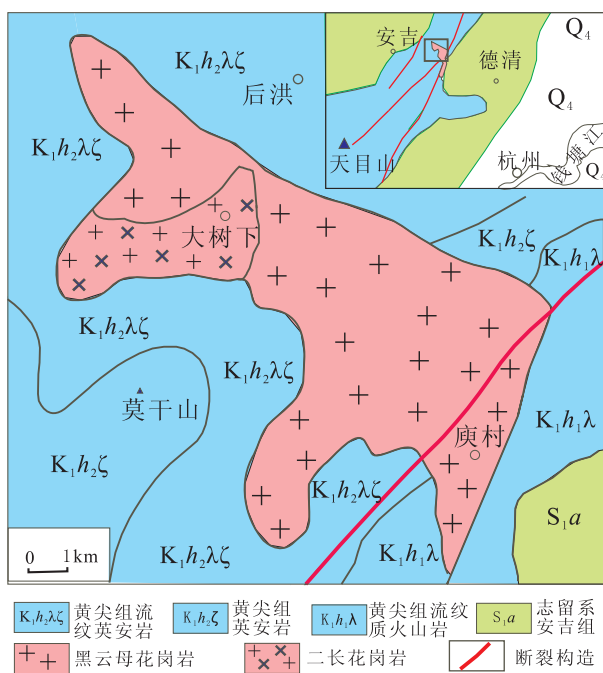


图 1 浙江莫干山花岗岩体地质图

Fig. 1 Geologic map of the Mogaoshan granite pluton

2 锆石 U-Pb 同位素定年

2.1 样品的预处理及测试方法

花岗岩样品采自莫干山岩体中部,为中粗粒黑云母钾长花岗岩,新鲜无蚀变。用于定年的花岗岩样品经重、磁方法分选出锆石,在双目镜下挑选各种不同长宽比、不同柱面和锥面发育程度的锆石颗粒,

将环氧树脂和乙二胺按照 1:7 均匀混合灌注锆石靶上,置于恒温箱(60℃)12 h 固结成型。磨蚀树脂靶至锆石核心部位出露,抛光。在锆石 U-Pb 定年前,先对锆石阴极发光图像(CL images)进行仔细观察,分析锆石内部结构,精选出作 U-Pb 同位素定年的锆石。锆石阴极发光图像在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素测定在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室进行。工作参数为:激光脉冲频率为 5 HZ,脉冲能量为 0.08~0.10 mJ,熔蚀孔径为 25 μm。每颗锆石微区原位测试点的同位素比值和 U-Pb 定年由 GLITTER(ver4.0, Macquarie University)软件计算,谐和图的绘制及加权平均年龄计算采用 Isoplot 2.49^[4]软件。

2.2 定年结果

具代表性的莫干山黑云母钾长花岗岩样品(4214)中的锆石多呈自形短柱状,长约 100~150 μm,宽 30~60 μm,自形程度一般。锆石阴极发光图像显示其具有发育良好的韵律环带,没有发现继承锆石,显示出岩浆成因的特点^[5](图 2)。对 16 颗锆石进行 LA-ICPMS U-Pb 同位素测试分析,共测 20 个点,定年结果见表 1,测点均位于锆石的结晶环带上(图 2),谐和性良好。两个测点因年龄偏小(<100 Ma),与所测得的大部分锆石点的年龄不匹配,偏差较大,故不用于统计。18 个测试点²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄变化在 139~121 Ma 之间加权平均值为 128.12.1 Ma,MSWD=4.4(图 3)。

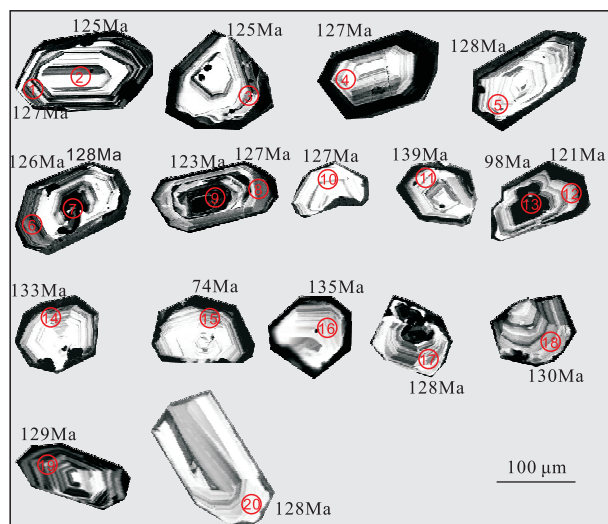


图 2 莫干山花岗岩锆石样品(4214)的阴极发光图像(CL) 图中圆圈代表激光束斑的剥蚀范围

Fig. 2 CL images of zircons from the Mogaoshan granite pluton The circles represent ablation spots by the laser

表 1 莫干山花岗岩体锆石 LA-ICPMS 的 U-Pb 同位素定年结果
Table 1 LA-ICPMS dating results of zircons from the Mogaoshan granite pluton

样品号	同位素比值										年龄/Ma					
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ
4124-1	0.0595	0.00167	0.16311	0.00452	0.01989	0.00028	0.0052	0.00019	585	36	153	4	127	2	105	4
4124-2	0.07419	0.00262	0.20086	0.00692	0.01964	0.00031	0.00489	0.00016	1047	44	186	6	125	2	99	3
4124-3	0.05418	0.00175	0.14621	0.00467	0.01958	0.00029	0.00427	0.00014	379	45	139	4	125	2	86	3
4124-4	0.04801	0.00105	0.1322	0.00293	0.01997	0.00026	0.00415	0.00011	100	29	126	3	127	2	84	2
4124-5	0.04712	0.00283	0.13005	0.00771	0.02002	0.00034	0.00407	0.00016	55	97	124	7	128	2	82	3
4124-6	0.04993	0.00142	0.13629	0.00385	0.0198	0.00028	0.00409	0.00011	192	40	130	3	126	2	82	2
4124-7	0.04657	0.00079	0.12903	0.00229	0.0201	0.00025	0.00413	0.00009	27	21	123	2	128	2	83	2
4124-8	0.05305	0.00189	0.14526	0.00509	0.01986	0.0003	0.00415	0.00014	331	52	138	5	127	2	84	3
4124-9	0.08933	0.00168	0.23737	0.0045	0.01927	0.00026	0.00419	0.00009	1411	18	216	4	123	2	85	2
4124-10	0.0453	0.00277	0.12461	0.00751	0.01995	0.00034	0.00395	0.00019	-4	97	119	7	127	2	80	4
4124-11	0.05261	0.00242	0.15796	0.00706	0.02178	0.00038	0.00466	0.00019	312	70	149	6	139	2	94	4
4124-12	0.05738	0.00114	0.14929	0.00303	0.01887	0.00025	0.00458	0.00014	506	23	141	3	121	2	92	3
4124-13	0.06062	0.00084	0.12781	0.00192	0.01529	0.00019	0.00411	0.0001	626	15	122	2	98	1	83	2
4124-14	0.07918	0.0048	0.2276	0.0133	0.02085	0.00034	0.00624	0.00008	1177	123	208	11	133	2	126	2
4124-15	0.05277	0.0047	0.08455	0.00735	0.01162	0.00028	0.00168	0.00009	319	153	82	7	74	2	34	2
4124-16	0.0643	0.00338	0.18718	0.00959	0.02112	0.00039	0.00532	0.00024	752	77	174	8	135	2	107	5
4124-17	0.0542	0.00186	0.14966	0.00509	0.02003	0.00029	0.00481	0.00015	379	50	142	4	128	2	97	3
4124-18	0.0494	0.00229	0.1384	0.00633	0.02032	0.00033	0.00469	0.00019	167	76	132	6	130	2	95	4
4124-19	0.05872	0.00165	0.16345	0.00456	0.02019	0.00029	0.00533	0.00018	557	36	154	4	129	2	107	4
4124-20	0.04938	0.00191	0.13637	0.0052	0.02003	0.00031	0.0042	0.00016	166	60	130	5	128	2	85	3

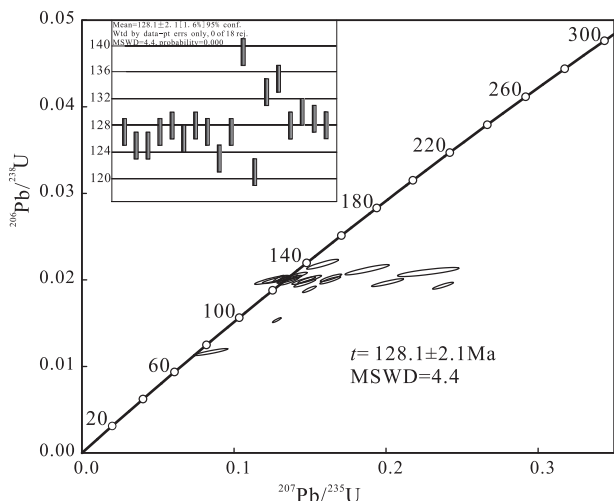


图3 莫干山花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄图
Fig. 3 U-Pb concordia diagram of zircon U-Pb dating for the Moganshan granite pluton

3 全岩 Rb-Sr 同位素定年

3.1 样品特征及分析方法

在岩相学研究基础上,选择新鲜未蚀变且有代表性的中粗粒黑云母钾长花岗岩、黑云母二长花岗岩及细粒花岗岩的 7 件样品进行 Rb-Sr 同位素测定。Rb、Sr 含量以及同位素的化学分离与质谱测定均在南京大学现代分析中心同位素质谱实验室完成。使用仪器是 VG354 质谱计,采用⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.1194 进行 Sr 同位素质量分馏校正,对 Sr 同位素标样(NBS987)测定的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.710239 ± 0.000008

(2),全实验流程的空白本底为(1~2) × 10⁻⁹ g。

3.2 定年结果

7 件莫干山花岗岩样品的 Rb、Sr 同位素分析结果见表 2。根据表 2 中 7 个花岗岩样品计算得出的 Rb-Sr 等时线年龄值为 135.4 ± 4.3 Ma,初始值 I_{Sr} = 0.70933 ± 0.00077。样品点在等时线上分布较均匀,线性关系良好(图 4),低的 MSWD 值和较小的年龄值误差表明该年龄值可信度高,可代表莫干山花岗岩的冷却结晶时间。

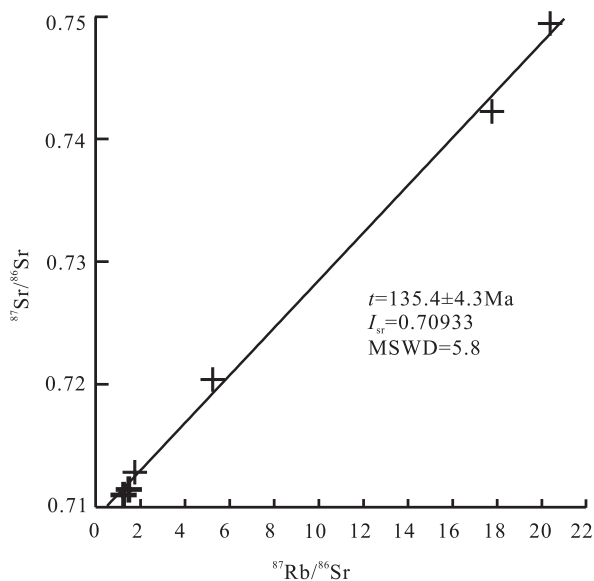


图4 莫干山花岗岩的 Rb-Sr 等时线
Fig. 4 Rb-Sr isochron of the Moganshan granite pluton

表 2 莫干山花岗岩 Rb-Sr 同位素分析结果

Table 2 Rb-Sr isotopic data of the Moganshan granite pluton

序号	样号	岩性	Rb(×10 ⁻⁶)	Sr(×10 ⁻⁶)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Rb	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr ± 2σ	I _{Sr} (t)
1	5112	黑云母二长花岗岩	141.26	331.76	1.232	0.710963 ± 0.000013	0.70859
2	1150	黑云母二长花岗岩	159.68	265.44	1.741	0.712826 ± 0.000029	0.70947
3	5129	黑云母钾长花岗岩	125.66	69.56	5.232	0.720373 ± 0.000013	0.71030
4	5516	黑云母钾长花岗岩	219.93	35.96	17.751	0.742229 ± 0.000026	0.70813
5	5114	细粒花岗岩	271.73	38.76	20.362	0.749398 ± 0.000032	0.71021
6	MB-1	黑云母二长花岗岩	167.44	329.68	1.469	0.711415 ± 0.000017	0.70858
7	MB-2	黑云母二长花岗岩	172.4	315.6	1.634	0.713549 ± 0.000011	0.71040

4 莫干山花岗岩 Sr-Nd-O 组成

4.1 样品分析方法

样品的 Nd、Sm 含量以及同位素的化学分离与质谱测定均在南京大学现代分析中心同位素质谱实验室 VG354 质谱仪完成。Nd 同位素比值测定采用¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 进行标准化,标样(BCR-1)的测定值为¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.512662 ± 8(2σ),Nd 的

全实验流程本底为(5~7) × 10⁻¹¹ g。

本文测试氧同位素组成的全岩样品先用 BrF₅ 法提取氧,再由碳炉转化为 CO₂ 气体后,用质谱仪 MAT-252 测定,分析精度为万分之二。

4.2 分析结果

莫干山花岗岩样品 Rb、Sr、Sm、Nd、O 的含量及其同位素分析结果列于表 3。

表 3 莫干山花岗岩 Sr-Nd-O 同位素分析结果

Table 3 Sr-Nd-O isotopic compositions for the Moganshan granite

样号	MB-1	09-1	1150	5129	5516
岩性	二长花岗岩	花岗岩	二长花岗岩	钾长花岗岩	钾长花岗岩
Rb($\times 10^{-6}$)	167.44	308.6	159.68	125.66	219.93
Sr($\times 10^{-6}$)	329.68	32.7	265.44	69.56	35.96
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	1.469	27.33	1.741	5.232	17.751
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$	0.711415 \pm 17	0.754680 \pm 11	0.712826 \pm 29	0.720373 \pm 13	0.7422293 \pm 26
$i_{\text{Sr}(t)}$	0.70858	0.70613	0.70947	0.71030	0.70813
Sm($\times 10^{-6}$)	7.426	8.066	未测	未测	未测
Nd($\times 10^{-6}$)	39.27	36.46	未测	未测	未测
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1135	0.1338	未测	未测	未测
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	0.51237 \pm 17	0.512254 \pm 14	未测	未测	未测
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	-3.75	-6.4	-	-	-
$t_{2\text{DM}}/\text{Ma}$	1237	1449	-	-	-
$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	9.78	未测	10.78	8.86	9.84
数据来源	本文	文献[6]	本文	本文	本文

注: Nd 同位素初始值的计算根据 $t=128\text{Ma}$; 计算 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 时采用的参数值为: $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=1967$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.512638$; - 为未测出

5 讨论

5.1 成因类型

(1) Rb-Sr 年代学研究表明, 莫干山花岗岩具有较低的初始铯同位素比值(0.70858~0.7104)(表 2), 明显低于华南广泛分布的 S 型花岗岩(0.7140~0.7303)^[7], 其投影点位于陆壳演化线下方, 偏向地幔演化线一侧(图 5)。

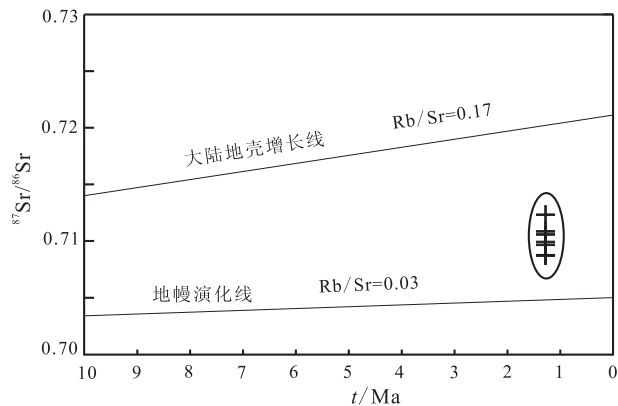


图 5 莫干山花岗岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - t 图解(据文献[8])

Fig. 5 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. t diagram for the Moganshan granite pluton (modified from ref. [8])

(2) 莫干山花岗岩代表成岩时源区的钕初始值 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -3.75~-6.4(表 3), 在 $\epsilon_{\text{Nd}}-t$ 图解上, 其投影点位于华南元古代地壳的演化范围上方的壳幔过渡区内(图 6); 在 $\epsilon_{\text{Nd}}-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解上, 位于 I 型花岗岩的分布范围内(图 7)。

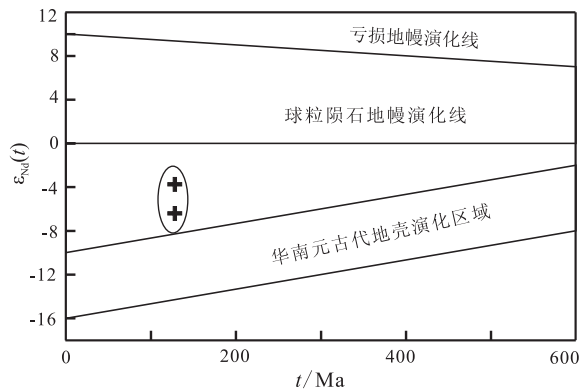


图 6 莫干山花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}-t$ 关系图

Fig. 6 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ vs. t diagram for the Moganshan granite pluton

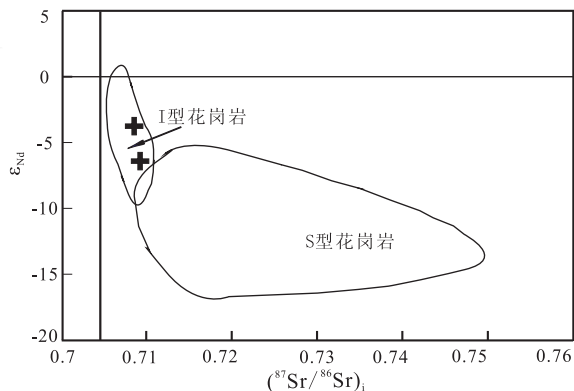


图 7 莫干山花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 关系图(据文献[9])

Fig. 7 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ vs. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ diagram for the Moganshan granite pluton(modified from ref. [9])

(3) 据 Faure^[10] 研究,以球粒陨石为代表的平均地幔的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 5.7‰,而地壳岩石(沉积岩、花岗岩、变质岩)具有比地幔更高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,其变化范围很大。因此,岩石氧同位素组成为识别火成岩源区特征和判别其成因提供了一种有效的示踪手段。莫干山花岗岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 8.86‰~10.78‰(平均值为 9.81‰)(表 3),低于华南 S 型花岗岩($\delta^{18}\text{O}$ = 10.6‰~12.4‰)^[6],在 $\delta^{18}\text{O}$ -($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 图解中其投影点均落在向上凸出的混合曲线范围内(图 8),表明是壳-幔物质混合的结果。

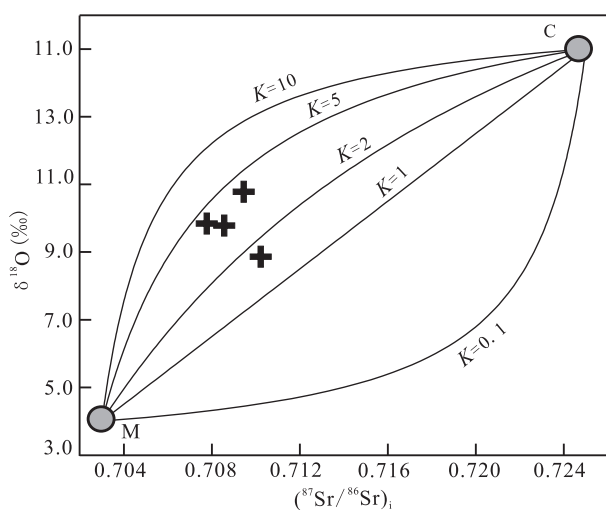


图 8 莫干山花岗岩的 $\delta^{18}\text{O}$ vs. ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 图解
Fig. 8 $\delta^{18}\text{O}$ vs. ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i diagram for the Moganshan granite pluton

Sr-Nd-O 同位素组成的以上三点特征充分表明,莫干山花岗岩不是大陆地壳物质直接重熔改造的产物,而可能是由一定数量幔源物质与地壳物质混合形成的。这为其属于 I 型^[11](或同熔型^[12])花岗岩提供了重要的同位素地球化学佐证。

5.2 钨模式年龄及地质意义

根据岩石样品中钨同位素组成计算得出的钨同位素模式年龄(t_{DM}),一般可以提供有关壳-幔分异时间(或古地壳形成时间)的信息。相对于亏损地幔计算得出的莫干山花岗岩的钨模式年龄值(t_{DM})为 1187~1709 Ma,变化范围过大,因而不具实际地质意义。考虑到地壳的演化是一个长期多阶段的地质过程,而单阶段钨模式年龄值(t_{DM})一般仅代表壳-幔首次分异的时间,因而采用两阶段演化模式可以较客观地反映地壳演化的多阶段性特征,更合理地探讨本地区古地壳的形成时间。本文采用陈江峰等^[13]提出的两阶段钨模式年龄计算公式将表 3 中

有关数据代入,得到莫干山花岗岩两阶段模式年龄的 $t_{2\text{DM}}$ 为 1237~1449 Ma,两者相差较小,平均 1343 Ma,暗示形成莫干山花岗岩的壳源物质可能与中元古代地壳有关。

5.3 壳-幔物质混合比例的估算(Nd-Sr 双变量二元混合公式)

前述莫干山花岗岩的 Sr-Nd-O 同位素相关特征表明其成岩物质是由部分地壳组分和部分地幔组分混合形成的。因此,为了探讨壳-幔物质在形成莫干山花岗岩中的贡献,我们假设华南上地壳(C)及亏损地幔(M)为其混合端员的组成,采用年龄校正($t=128$ Ma)后的亏损地幔端员和华南上地壳端员的同位素参数(表 4)并按 Langmuir 等^[14]提出的双变量 Sr-Nd 二元混合方程式,分别拟合作出 K 值 [$K=(\text{Sr}/\text{Nd})_{\text{M}}/(\text{Sr}/\text{Nd})_{\text{C}}$] 为 1.5 和 10 的混合曲线并示于图 9。

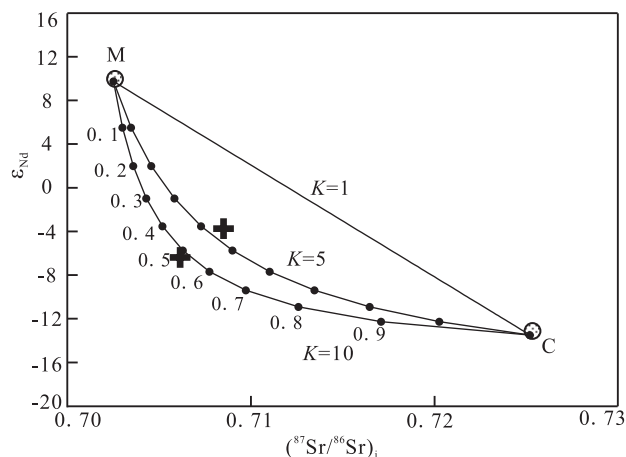


图 9 莫干山花岗岩 Nd-Sr 同位素二元混合曲线
Fig. 9 Bivariate and two-components (Sr-Nd) mixing curves for K=1, 5, 10 and Nd, Sr initial isotopic compositions of the Moganshan granite pluton

线上数字代表地壳端员(C)所占重量分数; $K=(\text{Sr}/\text{Nd})_{\text{M}}/(\text{Sr}/\text{Nd})_{\text{C}}$

The values at the curves give the weight fractions of C in the mixture; $K=(\text{Sr}/\text{Nd})_{\text{M}}/(\text{Sr}/\text{Nd})_{\text{C}}$

图 9 莫干山花岗岩 Nd-Sr 同位素二元混合曲线
Fig. 9 Bivariate and two-components (Sr-Nd) mixing curves for K=1, 5, 10 and Nd, Sr initial isotopic compositions of the Moganshan granite pluton

从图 9 可见,莫干山花岗岩的投影点偏离 $K=1$ 的混合直线,而分别位于 $K=5$ 、 $K=10$ 混合曲线近旁,意味着若用简单的混合模型计算花岗岩浆中壳幔物质贡献会产生很大的偏差。因此,本文将莫干山花岗岩的 Sr、Nd 同位素组成及有关参数(表 3、表 4)代入 Sr-Nd 双变量二元混合公式,计算得出莫干山花岗岩源区物质中地壳组成(f_{C})占 47%~49%,地幔组成(f_{M})占 51%~53%(表 4),两者大致相当。

5.4 与早白垩世火山岩的关系

(1) 在同位素年龄方面,李坤英等^[1]认为,建德

表 4 双变量二元混合方程所选用同位素端员值及计算结果

Table 4 The data and the results of the two-component mixing equation

名称	样品	Sr($\times 10^{-6}$)	Nd($\times 10^{-6}$)	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	资料来源	$f_c(\%)$	$f_M(\%)$
莫干山	MB-1	329.7	39.27	0.70856	-3.75	本文	0.47	0.53
花岗岩	09-1	32.7	36.46	0.70613	-6.5	文献[6]	0.49	0.51
亏损地幔		470	14	0.7025	9.73	文献[10]	0	100
华南上地壳		140	28	0.7252	-13.5	文献[15]	100	0

群黄尖组火山岩中锆石 U-Pb 年龄为 129.5 ± 2.6 Ma, 黄尖组流纹岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 127.94 Ma, 这与莫干山花岗岩锆石 U-Pb 年龄(128.1 Ma)及 Rb-Sr 等时线年龄(135.4 Ma)基本一致。

(2) 在 Nd-Sr 同位素组成方面, 建德群黄尖组英安岩的 $I_{\text{Sr}} = 70923$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -5.6$, $t_{\text{DM}} = 1381$ Ma^[6], 与莫干山花岗岩的 Nd-Sr 同位素组成($I_{\text{Sr}} = 0.70933$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -3.75 \sim -6.5$, $t_{\text{DM}} = 1343$ Ma) 很相似, 表明它们具有相同的物质来源。

(3) 在莫干坞—庾村一带可见细粒花岗岩小岩枝穿插在建德群黄尖组英安质火山岩中。结合同位素年代学及 Nd-Sr-O 同位素结果, 我们认为莫干山花岗岩与建德群黄尖组火山岩属同一构造岩浆热事件, 来自同一岩浆源, 是岩浆不同结晶演化程度和不同活动方式的产物。

6 结 论

(1) 莫干山花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 128.1 ± 2.1 Ma, 全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 135.4 ± 4.3 Ma, 表明莫干山花岗岩是燕山晚期构造岩浆活动的产物。

(2) Sr-Nd-O 同位素组成表明, 莫干山花岗岩属于典型的壳幔混源型(I型)花岗岩, 按 Nd-Sr 二元混合方程式计算其地壳组成和地幔组成分别约占 48% 和 52%。

(3) 莫干山花岗岩与建德群黄尖组火山岩的锆石 U-Pb 年龄与全岩 Rb-Sr 等时线年龄一致, 其 Nd-Sr 同位素组成及 Nd 模式年龄也很相似, 表明它们在时间、空间、构造背景等方面存在十分密切的成因联系, 并来自同一壳-幔混合的岩浆源。

参考文献 (References):

[1] 李坤英, 王小平, 沈加林. 浙江建德群的时代归属[J]. 地质论评, 1988, 34(6): 485—495.
Li Kunying, Wang Xiaoping, Shen Jialin. Age assignment of the Jiande group, Zhejiang Province[J]. Geological Review, 1988, 34(6): 485—495. (in Chinese with English abstract)

[2] 章邦桐. 浙江省莫干山花岗岩体 K-Ar 年龄[A]. 叶伯丹. 全国同位素地质年龄汇编(第四辑)[C]. 北京: 地质出版社, 1982: 464—465.

Zhang Bangtong. K-Ar ages for the Moganshan granite pluton in Zhejiang Province[A]. Ye Bodan. A collection of isotopic ages of China[C]. Beijing: Geological Publishing House, 1982: 464—465. (in Chinese)

[3] 浙江省地质矿产局. 浙江省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 6—41.

Regional geology of Jiangxi Province. Bureau of geology and mineral resources of Zhejiang Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988:6—41. (in Chinese)

[4] Ludwig K R. Isoplot: A plotting and regression program for radiogenic-isotope data[A]. US Geological Survey Open-File Report[R]. 1991: 39.

[5] Pidgeon R T. Recrystallisation of oscillatory zoned zircon: Some geochronological and petrological implications[J]. Contrib. Mineral Petrol., 1992, 110: 463—672.

[6] 沈渭洲, 凌洪飞, 王德滋, 徐步台, 俞云文. 浙江省中生代火成岩的同位素研究[J]. 地质科学, 1999, 34(2): 223—232.
Shen Weizhou, Lin Honfei, Wang Dezi, Xu Butai, Yu Yunwen. Study on Nd-Sr isotopes of Mesozoic igneous rocks in Zhejiang, China[J]. Scientia Geologica Sinica, 1999, 34(2): 223—232. (in Chinese with English abstract)

[7] 张祖还, 章邦桐. 华南产铀花岗岩及有关铀矿床研究[M]. 北京: 原子能出版社, 1991.

Zhang Zuhuan, Zhang Bangtong. On the uranium-bearing granites and their related uranium deposits in south China [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1991. (in Chinese)

[8] Rollison H R. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation [M]. New York: Longman Scientific & Technical Limited, 1993: 228.

[9] Lin H F, Shen W Z, Wang R C. Geochemical characteristics and genesis of Neoproterozoic granitoids in the Northwestern margin of the Yangtze Block[J]. Phys. Chem. Earth., 2001, 26: 805—819.

[10] Faure G. Principles of isotope geology[M]. New York: John Wiley and Sons, 1986:321—343.

[11] Chappell B W, White A J R. I- and S-type granites in the Lachlan fold belt, southeastern Australia[A]. Xu K Q. Geology of granites and their metallogenetic relation[M]. Beijing: Science Press, 1986: 87—102.

[12] Xu K C, Sun N, Wang D Z, Hu S X, Liu Y J, Ji S Y. Petrogenesis of the granitoids and their metallogenetic relations in South China[A]. Xu K Q, Tu G C. Geology of granites and their metallogenetic relation [M]. Beijing: Science Press, 1986: 1—32.

- evolution modeling system and its application[A]. Hao D H [S]. Treatises of X III Kerulien international conference of geology[C]. Shijiazhuang, P. R. China: Shijiazhuang University of Economics[C]. 2001: 25-27.
- [26] 肖丽华, 孟元林, 牛嘉玉, 王志国, 殷秀兰, 祝文亮, 张连雪, 王昕. 歧口凹陷沙河街组成岩史分析和成岩阶段预测[J]. 地质科学, 2005, 40(3): 346-362.
Xiao Lihua, Meng Yuanlin, Niu Jiayu, Wang Zhiguo, Yin Xiulan, Zhu Wenliang, Zhang Lianxue, Wang Xin. Diagenetic history and diagenetic stages prediction of ShanHeJie formation in the Qikou sag[J]. Chinese Journal of Geology, 2005, 40(3): 346-362. (in Chinese with English abstract)
- [27] 孟元林, 李娜, 黄文彪, 肖丽华, 刘德来, 张清华, 孙洪斌, 修洪文, 高建军. 辽河拗陷西部斜坡带南段沙三段成岩相分析与优质储层预测[J]. 古地理学报, 2008, 10(1): 33-41.
Meng Yuanlin, Li Na, Huang Wenbiao, Xiao Lihua, Liu Delai, Zhang Qinghua, Sun Hongbin, Xiu Hongwen, Gao Jianjun. Diagenetic facies analyses and high-quality reservoir predictions in the southern part of the western slope of Liaohe Depression[J]. J. Palaeo-geography, 2008, 10(1): 33-41. (in Chinese with English abstract)
- [28] 孟元林, 王又春, 姜文亚, 张景军, 刘德来, 牛嘉玉, 孙洪斌, 施尚明, 古团, 修洪文. 辽河拗陷双清地区古近系沙河街组四段孔隙度演化模拟[J]. 古地理学报, 2009, 11(2): 225-232.
Meng Yuanlin, Wang Youchun, Jiang Wenya, Zhang Jingjun, Liu Delai, Niu Jiayu, Sun Hongbin, Shi Shangming, Gu Tuan, Xiu Hongwen. Porosity evolution simulation of the Member 4 of Shahejie Formation of Paleogene in Shuangqing area, Liaohe Depression[J]. J. Palaeo-geography, 2009, 11(2): 225-232. (in Chinese with English abstract)
- [29] 赵澄林, 胡爱梅, 陈碧珏, 梁官忠. 油气储层评价方法(中华人民共和国石油与天然气行业标准 SY/T 6285-1997)[S]. 北京: 石油工业出版社, 1997, 8-9.
Zhao Chenglin, Hu Aimei, Chen Bijue, Liang Guanzhong. Evaluating methods of oil and gas reservoirs(Petroleum industry criterion in P. R. C. SY/T 6285-1997) [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 8-9. (in Chinese)
- [30] 孟元林, 高煜婷, 吴河勇, 王成, 修洪文, 张安达, 李亚光, 姜文亚. 松辽盆地北部中浅层区域成岩规律及其影响因素[J]. 古地理学报, 2010, 12(1): 97-106.
Meng Yuanlin, Gao Yuting, Wu Heyong, Wang Cheng, Xiu Hongwen, Zhang Anda, Li Yaguang, Jiang Wenya. The regional regular diagenetic characteristics and controls of the middle-shallow horizons in the northern Songliao Basin[J]. J. Palaeo-geography, 2010, 12(1): 97-106. (in Chinese with English abstract)
- [31] 孟元林, 刘文慧, 孟凡晋, 梁伯勋, 王建伟, 潘雪梅, 田伟志, 王维安, 丁桂霞, 周振东, 肖丽华. 盆地徐家围子断陷深层异常高孔带分布特征与成因分析[J]. 古地理学报, 2011, 13(1): 75-84.
Meng Yuanlin, Liu Wenhui, Meng Fanjin, Wang Jianwei, Pan Xuemei, Tian Weizhi, Wang Weian, Ding Guixia, Zhou Zhendong, Xiao Lihua. Distribution and causes of the anomalously high porosity zones of the Xujiaweizi Fault Depression[J]. J. Palaeo-geography, 2011, 13(1): 75-84. (in Chinese with English abstract)
-
- (上接第 353 页)
- [13] 陈江峰, 江博明. 钕、锶、铅同位素示踪和中国东南大陆地壳演化[A]. 郑永飞. 化学地球动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 262-287.
Chen Jiangfeng, Jiang Boming. Nd, Sr, Pb isotopic tracer and continental crust evolution of SE China [A]. Zheng Yongfei. Chemical geodynamics[M]. Beijing: Science Press, 1999: 262-287. (in Chinese)
- [14] Langmuir C H, Vocke R D, Hanson G N. A general mixing equation with applications to Icelandic basalts[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1978, 37: 380-392.
- [15] 刘昌实, 朱金初, 沈渭州, 徐士进. 华南陆壳改造花岗岩类型划分和成岩物质来源[J]. 地质学报, 1990, 64(1): 43-52.
Liu Changshi, Zhu Jinchu, Shen Weizhou, Xu Shijin. Classification and source materials of continental crust transformation series granitoids in south China[J]. Acta Geologica Sinica, 1990, 64(1): 43-52. (in Chinese with English abstract)